

지하철 터널내 열차풍 예측 프로그램 개발에 관한 연구

A Study on the Development of the Train Wind Rate Prediction Program in Tunnel of the Subway

김종열 · 최광환

J. R. Kim and K. H. Choi

Key Words : Branch(구간), Concourse(중층), Node(접점), Platform(승강장), Subway(지하철), Train Wind(열차풍), Uncomfortable Sense(불쾌감), Ventilation(환기)

Abstract : Subway is one of the most important transportation and its facilities are increased by the drift of population to cities in these days. But heat generation results from lighting, human and traffic increase in subway, half-closed space, gives uncomfortable sense to the subway passengers.

Therefore, natural ventilation by piston effect is done to relieve uncomfortable sense. But train wind by piston effect gives uncomfortable sense to the subway passengers, too.

So the numerical calculation of inflow and outflow amounts is important to predict thermal environment and reduce train wind.

In case of actual survey of train wind in target station, the amount of train wind are about 3100m³/train at the minimum, about 6000m³/train at the maximum, about 4200m³/train on average. When comparison between simulation for train wind prediction and actual survey for accuracy was done train wind prediction program showed similar results.

	기호설명	ΔT : 시간간격,	sec
		u : 열차속도,	m/s
		v : 기류속도,	m/s
a	: 열차단면적, m ²		
A	: 단면적, m ²		
c	: 공기의 비열, J/kg · k		그리스 문자
D	: 구간의 수력직경, m		
g	: 중력가속도, m/s ²	γ : 비열비	-
h	: 수송계수 -	ζ : 국부손실계수	-
L	: 구간의 길이, m	λ : 벽면마찰계수	-
ℓ	: 열차길이, m	ρ : 공기밀도,	kg/m ³
p	: 압력(게이지 압력), Pa	σ : 폐색률	-
δP	: 기류구동력, Pa	ψ : 요동비속도,	m/s
δP_B	: 부력에 의한 압력, Pa		
δP_F	: 환기팬의 압력, Pa		상첨자
δP_T	: 열차운행에 의한 압력, Pa		
δP_w	: 지상풍압, Pa	old : ΔT 초전의 값	
Q	: 열차풍량, m ³ /train		
q	: 풍량, m ³ /s		하첨자
t	: 시간, sec		

접수일 : 1999년 3월 9일
김종열 : 경상대학교 해양산업연구소
최광환 : 부경대학교 냉동공조공학과

i : 상류측 존 및 접점
j : 하류측 존 및 접점
ij : 접점 ij를 결합하는 구간

1. 서론

일반적으로 지하공간에서의 온도변화는 대기보다 완만하여 지상보다 여름은 시원하고 겨울은 따뜻하였다. 지하철의 개통 당시에는 이러한 지반의 열용량으로, 여름에도 낮은 온도로 유지할 수 있었으나 시간이 지남에 따라 지하철의 운행횟수 증가, 이용승객들의 증가, 조명설비의 증가로 인해 발열량이 증가하여 지하철 내에 열량이 축적되어 온도가 전반적으로 상승하고 있는 실정이다.

따라서 이에 대한 대책으로 지하철 개통과 동시에 지하철 내에 축적되는 열량을 기계적인 힘으로 지상으로 배출하는 시스템을 갖추고 있으며 동시에 냉방 시스템을 구축하고 있다. 하지만 여러 가지 이유로 당초의 설계대로 이러한 시스템을 가동하고 있지 않는 실정이며 지하철내의 열 및 공기환경은 점차 악화되고 있다.

본 연구자는 이러한 지하철 내의 온열환경을 예측하고 환기팬을 통해 배출되는 열량을 가늠할 수 있는 시뮬레이터를 개발하고 이를 실측을 통해 검증하여 보고¹⁾한 바 있다. 그러나 열차에 의한 풍량 및 기류를 정확히 해석하는 데 어려움이 있어 실측을 통해 이를 보완하였다.

열차풍이란 터널내를 달리는 열차의 피스톤 작용에 의해 생기는 바람이다. 지하철은 역사이의 거리가 약 1km로 열차가 출발, 가속, 등속, 감속, 정지를 반복하며 이에 따라 일어나는 열차풍은 시간과 함께 시시각각 변화하기 때문에 비정상적이다.

본 연구는 이러한 비정상적인 열차풍을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 열차풍량을 정량적으로 파악하여, 지하철 온열환경예측 프로그램의 정도를 향상시킬 뿐만 아니라 지하철 역사의 냉·난방 부하 계산, 열차풍량을 감소시킬 수 있는 구조계획에도 그 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 열차풍 실측

2.1 실측 대상역의 개요 및 형상

실측대상역은 섬식 승강장의 전형적인 지하철역인 부산지하철 1호선의 범내골역으로서, 열차풍속을 측정하여 열차풍량을 계산하는데 필요한 단면적을 확보하고 있기에 본 역을 대상으로 하였다. 열차는 보통 6량(60%)과 8량(40%)으로 운행되고 있으며 운전시격은 3분30초와 5분이다.

Table 1 Summary of Bumnaekol station

	Concourse	Platform
Floor area (m ²)	3680	2070
Cross sectional area (m ²)	64	135.6
Length (m)	230	230

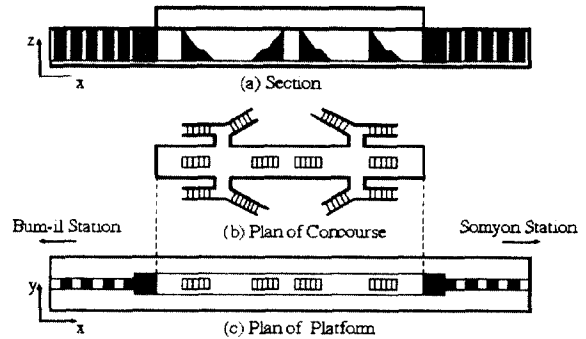


Fig. 1 Plan of Bumnaekol station

2.2 실측 기기 및 장소

실측기기는 디지털 온도습도계(Model 6511)로서 온도, 습도, 풍속을 동시에 측정할 수 있도록 되어 있으며 1초 간격으로 데이터를 읽어 들여 메모리에 저장한 다음 RS232C 케이블을 이용하여 퍼스널 컴퓨터에 데이터를 회수할 수 있도록 되어 있다.

실측장소는 터널에서 역으로 출입하는 열차풍을 측정하기 위해 Fig. 3(a)의 네 지점에서 측정하였다. 또한 승강장에서 중층으로 출입하는 풍량을 측정하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 M1, M2 두 지점에서 측정하였다. 그리고 중층에서 지상으로 출입하는 풍량을 측정하기 위해 M3, M4 두 지점에서 측정하였다.

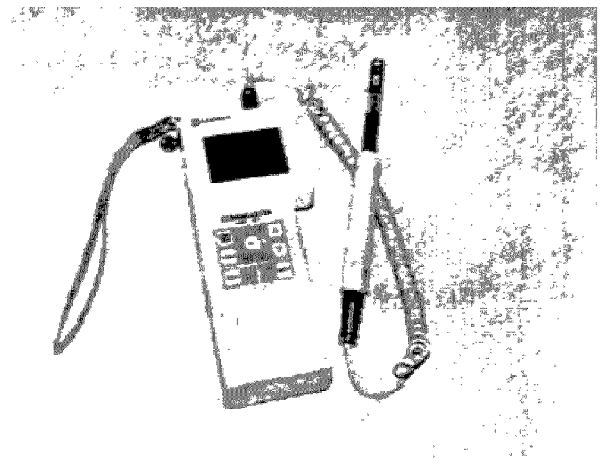


Fig. 2 Digital anemometer(Model 6511)

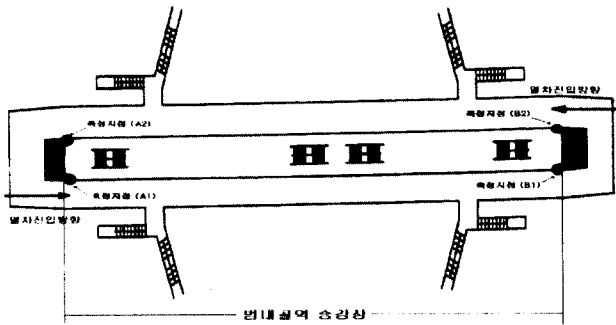


Fig. 3(a) Measuring points at platform

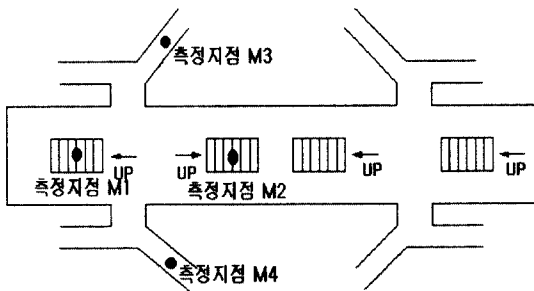


Fig. 3(b) Measuring points at concourse

2.3 실측방법

실측은 정도를 높이기 위하여 1997년 4월 11일과 4월 23일 2회에 걸쳐서 범내골역 터널부와 승강장이 접하고 단면적이 확보되는 4곳을 선정하여 매1초마다 데이터를 읽어들이도록 디지털 온습도계를 조작, 설치하여 800초(열차 2회 정도 출입) 동안 실측을 행하였다.

Fig. 3(a)에서 측정지점 A1, A2를 먼저 실측하고, B1, B2를 나중에 실측하는 방법으로 열차가 도착·출발할 때 주 진입선로와 반대편 선로에서의 풍속을 동시에 측정하였다. 열차풍량은 식(1)과 같이 유출, 유입시간에서 안정상태에 도달할 때까지의 시간으로 풍속을 적분하여 구하였다.

$$Q = A \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (1)$$

그리고 승강장에서 중층으로, 중층에서 지상으로 출입하는 풍량을 측정하는 데에는 디지털 온·습도계를 사용하여 풍속을 10초 간격으로 순시치를 측정하여 기록하였으며 동시에 풍향을 각각 기록하였다. 여기서 측정된 유속에 각 측정점의 단면적을 곱하여 풍량을 계산하였다.

그리고 현재 개발한 프로그램은 한 선로에서만 열차가 주행하는 것으로 가정하여 계산하고 있으

므로 실측 역시 이 조건에 가장 가까운 주행시간대인 새벽 5시 38분 30초에 범일동역을 출발하여 5시 39분 30초에 범내골역에 도착하는 6량 편성의 열차를 대상으로 실측을 하였다.

2.4 실측결과

터널에서 역으로 출입하는 열차풍량은 제1회 실측과 제2회 실측에서는 다소 약간의 풍량 차이는 있으나 유사한 값을 나타내고 있고 열차 비주행시의 기류속도 또한 유사하다. 지하철 구내 열차풍량 실측 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Result of actual survey

Direction of train	Train wind flowrate			
	First m ³ /train	Second m ³ /train	Ave. m ³ /train	Ave. m ³ /s
Bumnaekol→Bum-il	3464.9	3344.8	3404.85	64.79
Bum-il→Bumnaekol	3443	2734.9	3088.95	62.26
Somyŏn→Bumnaekol	5304.2	6727.4	6015.8	96.49
Bumnaekol→Somyŏn	3955.4	3983.3	3969.35	49.46

3. 열차풍 예측 프로그램

3.1 기본 이론

시뮬레이션을 위하여 환기회로망 모델(Air flow network model)개념을 도입하였다. 환기회로망 모델은 대상으로 하는 공간을 분할하고 각 구역에서는 완전혼합을 가정한다. 그리고 구역간에 교환되는 공기는 일차원적으로 흐르는 것으로 가정한다. 여기서, 각 구역은 두 개의 접점을 가지고 접점의 결합선을 구간이라고 부르면 지하공간은 접점과 구간으로 되고 환기회로망으로 변환된 접점에서 각 구역의 압력을 계산하고 각 구간에서의 풍량을 계산할 수 있다.

3.2 기류장의 예측모델

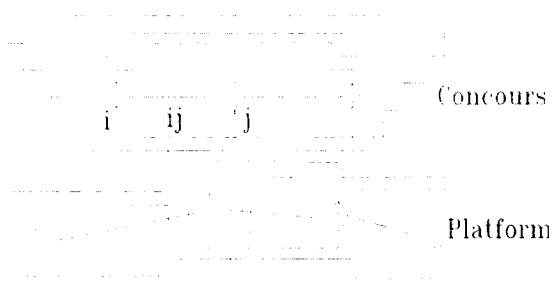


Fig. 4 Basic model of air flow network

구간 주변의 벽을 관로의 내벽으로 생각하면 구간을 따라 흐르는 기류는 관내류로 된다. 즉, Fig. 4에 표시한 점 i, j 와 이것을 연결하는 구간 ij 에 관해서 다음과 같은 기류의 운동방정식이 성립한다.

$$\rho_{ij} L_{ij} \frac{dv_{ij}}{dt} = - \left(\frac{\lambda_{ij} L_{ij}}{D_{ij}} + \zeta_{ij} \right) \frac{1}{2} \rho_{ij} |v_{ij}| v_{ij} + \delta P_{ij} + (p_i - p_j) \quad (2)$$

$$\delta P_{ij} = \delta P_{Bij} + \delta P_{Fij} + \delta P_{Wij} + \delta P_{Tij} \quad (3)$$

으로 표현된다. 그러나 범내골역 방향 본선 터널 기계환기팬은 가동하지 않고 열차의 피스톤 효과에 의한 자연환기방식을 채택하고 있어 기계환기팬에 의한 압력은 무시하였다. 그리고 부력에 의한 압력차와 지상풍의 압력차는 계산상 너무 복잡하므로 이후 무시하였다.

그러므로 본 시뮬레이션에서 사용한 기류 구동력 δP_{ij} 는

$$\delta P_{ij} = \delta P_{Tij} \quad (4)$$

열차의 주행에 의한 구동력 δP_T 는 森井교수의 모델³⁾을 사용해서 다음의 2차식을 연립해서 푼다.

$$\delta P_T = -\rho \frac{\sigma}{1-\sigma} (u-v) [|h_{11} \phi| + \frac{h_{12} |u-v| }{1-\sigma}] \quad (5)$$

$$\frac{\delta \phi}{dt} = \frac{\sigma}{1-\sigma} \left(\frac{du}{dt} + \frac{|h_{11} \phi|}{L-\ell} \left[\frac{u-v}{1-\sigma} + h_{11} \frac{\phi}{\gamma} \right] \right) \quad (6)$$

여기서,

$$h_{11} = \frac{-\gamma - \sqrt{2\gamma^2 + \gamma}}{2} \quad (7)$$

$$h_{12} = \frac{\gamma + 1}{4}$$

식(2)에 구간의 단면적 A_{ij} 를 곱해서 유량 q_{ij} 로

나타내면,

$$\frac{dq_{ij}}{dt} = - \left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\zeta_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{1}{2A_{ij}} |q_{ij}| q_{ij} + \frac{A_{ij} \delta P_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \quad (8)$$

$$a_{ij} = \left[- \left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\zeta_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{1}{2A_{ij}} |q_{ij}| q_{ij} + \frac{A_{ij} \delta P_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \right] \Delta t + q_{ij}^{old} \quad (9)$$

$$a_{ij} = - \left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\zeta_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{\Delta t}{2A_{ij}} < 0 \quad (10)$$

$$b_{ij} = \frac{A_{ij} \delta P_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} \Delta t + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \Delta t + q_{ij}^{old} \quad (11)$$

$$q_{ij} = a_{ij} |q_{ij}| q_{ij} + b_{ij} \quad (12)$$

$$q_{ij} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4a_{ij}b_{ij}}}{2a_{ij}} \quad (b_{ij} \geq 0) \quad (13)$$

$$q_{ij} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4a_{ij}b_{ij}}}{2a_{ij}} \quad (b_{ij} < 0)$$

로 된다.

그런데, 점 i 가 $j=1, \dots, m$ 의 복수의 점점과 접속하고 있을 때 i 에서 j 에 기류가 유출하는 경우, i 에 관한 연속의 식은

$$\sum_j^m \rho_{ij} q_{ij} = 0 \quad (14)$$

로 된다. 여기서 q_{ij} 에 식(13)을 대입해서 $\delta P_{ij}, p_j$ 를 미리 아는 값으로 하면 식(14)는 p_i 에 관한 비선형 방정식으로 된다. 식(14)의 좌변을 ϕ_i 로 쓰면, Newton-Raphson법에 의해서, p_i 가 다음 식의 수렴해로서 얻어질 수 있다.

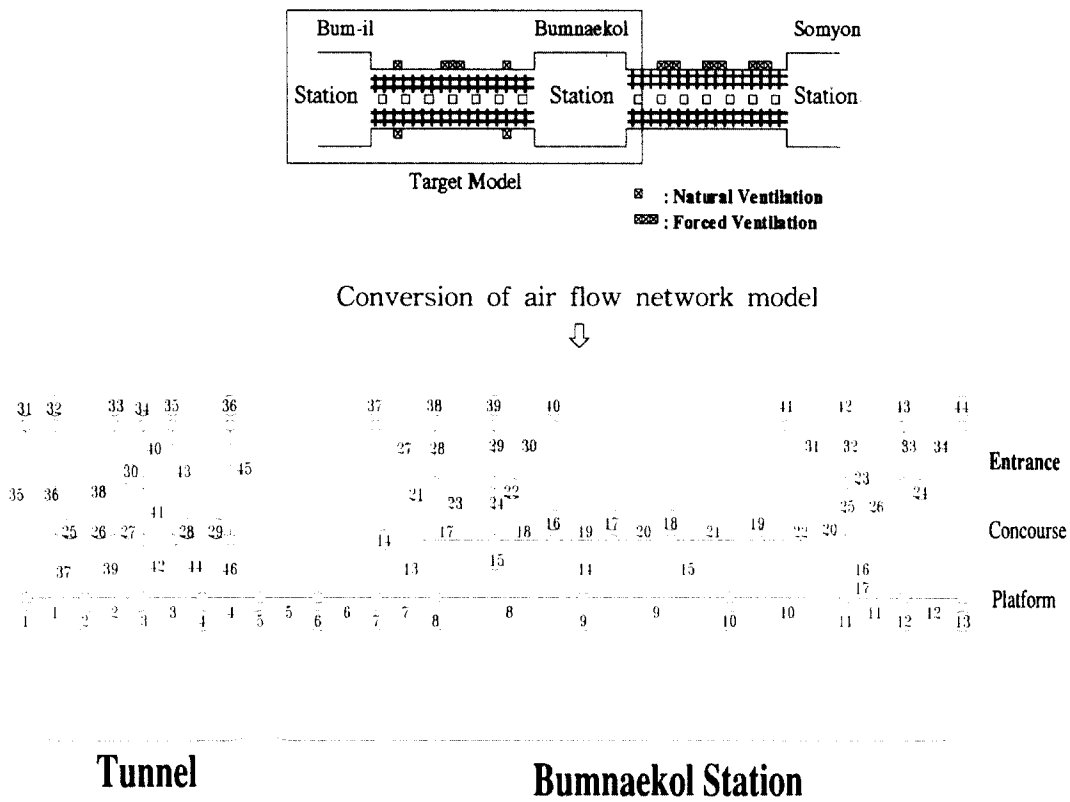


Fig. 5 Target model and air flow network of tunnel

$$p_i^{N+1} = p_i^N - \frac{\varphi_i(p_i^N)}{\varphi_i'(p_i^N)} \quad (15)$$

여기서 첨자 N은 N차의 근사해로 표시한다. 또 φ_i' 는 φ_i 를 p_i 에 대해서 미분한 것이다.

본 시뮬레이션에서는 모든 접점에 대해서 같은 방식으로 계산을 하여 각각의 압력을 구한다. 그리고, 각 접점의 압력을 식(9)에 대입해서 구간의 풍량을 얻는다.

3.3 국부손실계수(ζ)의 결정방법

압력손실을 Δp 로 하면 국부손실계수 ζ 는

$$\Delta p = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2 = \zeta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{q}{A} \right)^2 \quad (16)$$

로 정의된다.

ζ 로 나타내는 압력손실로서는 ① 구간 접속부에서의 단면적 변화에 따른 손실, ② 복수의 구간 접합부에서 발생하는 분기·합류손실, ③ 구간의

굴절에 의한 손실 등 구조에서 유래하는 손실을 생각할 수 있다.

일반적으로 ① 및 ③은 유속에 관계하지 않고 고정값이기 때문에 각각, 단면적비 또는 굴절각으로서 참고문헌³⁾을 참조해서 ζ 를 구했다.

3.4 벽면마찰계수(λ)의 결정방법

벤치, 휴지통, 조명기기, 간판, 계단의 층층계 등은 벽 표면의 거칠기로서 고려할 수 있다. 이러한 물체의 벽면에서의 높이 ε 와, 통로와 홈의 수력직경 D 를 다음의 Prandtl의 식

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log_{10} \frac{D}{\varepsilon} + 1.08 \quad (17)$$

에 대입해서 관마찰계수 λ 를 구한다. 본 논문에서는 ε 를 0.2~0.5m로 사용했다.

3.5 대상역의 환기회로망 변환

대상역으로 선정된 범넛골역에서의 기류 흐름을 Fig. 5와 같이 환기회로망으로 표시하였다.

3.6 프로그램 입력 데이터

	브랜치 번호	길이(m)	단면적(m ²)	둘레길이(m)	벽면마찰계수	국부손실계수
터널	1~4	47.5~240	50.1	29.4	0.06	0
플랫폼	5~12	5~59.5	44.9~77.8	40.3~46.5	0.06	0~4
계단	13~16	10.7	12.7	14.3	0.06	1.5
중층	17~22	8~38	24~64	20~40	0.06	0~4
출입구	23~26	5.35	35	27	0.06	1
출입구 계단	27~34	17.2~18.6	8.0~11.2	11.4~13.4	0.06	1.08~2.13
범일동역	35	11.45	58	30.5	0.06	20.9
자연환기구	36~39, 43~46	5~10	4.5~7.5	9~11	0.06	1.15~1.29
기계환기구	40~42	5~20	39.4~72	60~63	0.06	0.14~10

3.7 계산치와 측정치와 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 승강장에서 중층으로 가는 계단의 M1, M2에서 측정된 결과와 이 지점에서의 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다.

계산값과 측정값을 비교하면 약간의 차이가 있는데 이러한 원인으로서는 열차풍 예측 프로그램에서는 지하철내의 구조를 단순화하여 계산하였으며 아울러 지상 조건, 즉 지상에서 일어나는 기류 변화를 지하철내에서의 기류계산에 고려하지 않기 때문에 발생한 결과라고 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 중층에서 지상으로 연결되는 계단에서 M3, M4에서 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

승강장에서 중층으로 향하는 M1, M2와는 달리 지상의 기상조건에 매우 많은 영향을 받는 위치로 계산값과는 약간의 차이를 보이고 있는데, 이 역시 앞에서 언급한 바와 같이 지하철내의 선로가 굽어 있는 등, 복잡한 조건을 고려하지 않은 단순화에 의한 계산과 비교적 무풍인 날에 실측을 하지 못한 원인이 아닌가 판단된다.

따라서 본 프로그램의 예측정도를 향상시키기 위해서는 지하철내의 구조를 비교적 실제와 일치하도록 입력할 수 있는 방안으로 지하철 패도가 약간은 타원의 형태로 가는 것을 직선으로 처리하지 않고 실제대로 입력하여 계산하도록 하는 것과 온도차에 의해 발생하는 부력을 고려할 필요가 있으며, 또한 지상에서 유입되는 기류에 의해 지하철 터널에 미치는 영향을 줄이기 위해서는 지상의 조건이 무풍에 가까운 날을 선택하여 실측을 하는 것이 가장 바람직하다고 생각된다.

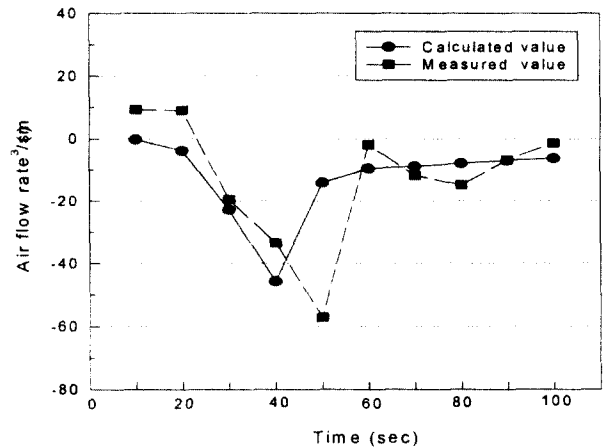


Fig. 6 Comparison of calculated value and measured value at point M 1

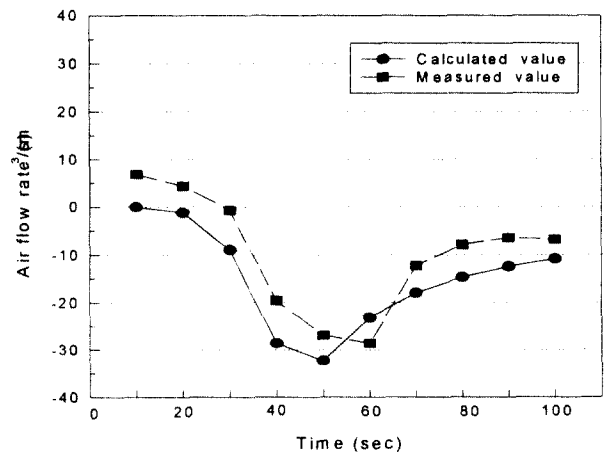


Fig. 7 Comparison of calculated value and measured value at point M 2

참고문헌

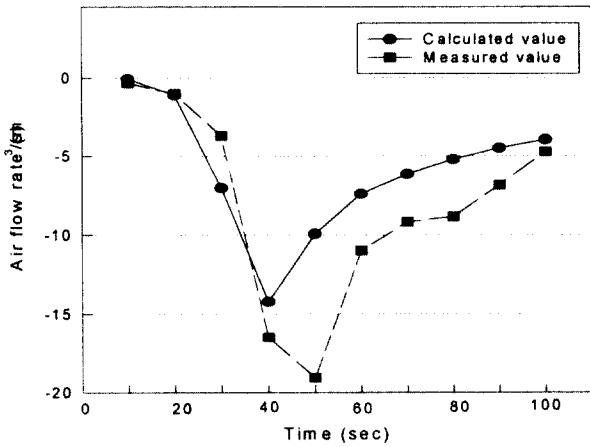


Fig. 8 Comparison of calculated value and measured value at point M 3

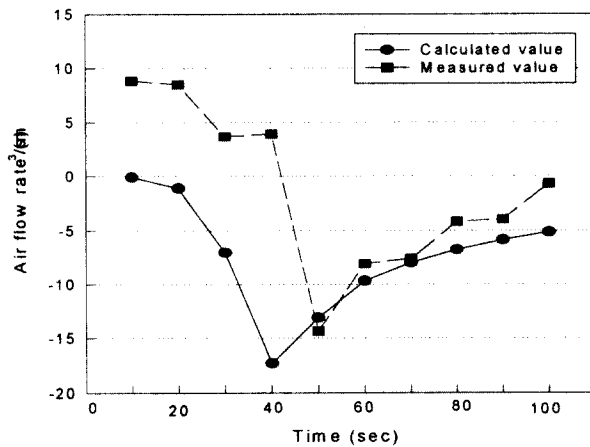


Fig. 9 Comparison of calculated value and measured value at point M 4

4. 결 론

지하철내 열차의 이동에 따른 풍량을 실측과 동시에 예측 프로그램을 개발하여 시뮬레이션 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실측결과 열차가 승강장으로 진입할 경우 최고 기류속도는 약 9%이상이었으며, 1열차에 의한 풍량은 유입량이 4500 m³/train, 유출량이 35000 m³/train 정도로 약 4000m³/train이었다.
- 2) 열차풍 예측 프로그램에 의한 계산치는 실측치와는 약간의 차이를 보였으나 이는 계산에서 터널의 구조를 단순화하여 계산하였기 때문으로 판단되며 또한 실측시 지상의 기후조건도 영향을 미치기 때문이라 생각된다.